

Controllo di un convertitore DC/DC veloce per i magneti di scansione dell'acceleratore medicale Cnao

M. Incurvati⁽¹⁾, F. Burini⁽¹⁾, M. Farioli⁽¹⁾, G. Taddia⁽¹⁾, M. Donetti⁽²⁾, S. Toncelli⁽²⁾, G. Venchi⁽³⁾, I. De Cesaris⁽⁴⁾, C. Sanelli⁽⁴⁾, F. Voelker⁽⁴⁾, S. Giordanengo⁽⁵⁾, F. Marchetto⁽⁵⁾ - OCEM⁽¹⁾, FONDAZIONE CNAO⁽²⁾, UNIVERSITÀ DI PAVIA⁽³⁾, INFN LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI⁽⁴⁾, INFN SEZIONE DI TORINO⁽⁵⁾

LA SFIDA

L'applicazione riguarda lo sviluppo di un sistema di regolazione e controllo per un convertitore DC/DC (alimentatore) per magneti di scansione utilizzati per muovere il fascio terapeutico nell'acceleratore medicale del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO). Le particolari esigenze di precisione e velocità hanno richiesto l'uso di hardware e software ad elevate prestazioni.

LA SOLUZIONE

Si è dunque selezionato un sistema PXI di National Instruments che permettesse contemporaneamente l'utilizzo di FPGA per l'implementazione dell'algoritmo di controllo, acquisizione analogica di adeguata precisione e velocità, sistemi di I/O digitale ed interfacciamento gestiti in real-time, nonché la possibilità di utilizzare hardware proprietario progettato per la specifica applicazione.

Il convertitore è implementato su piattaforma PXI. L'alimentatore è progettato per portarsi ad un qualunque livello di corrente nell'intervallo ± 550 A e mantenerlo in funzionamento continuo. Le specifiche richiedono che questo avvenga con velocità di variazione della corrente >100 kA/s ed in particolare che l'alimentatore rientri nella fascia di precisione di ± 100 ppm (± 55 mA) entro 200 μ s per gradini di corrente ≤ 15 A.

L'utente finale dell'alimentatore è il sistema che si occupa della distribuzione della dose sul volume del tumore (Beam Delivery System - BDS). Il BDS comunica all'alimentatore la corrente a cui portarsi attraverso una linea seriale a 4 Mbaud in fibra ottica e con un'analogica linea l'alimentatore deve trasmettere al BDS la corrente di riferimento, la corrente del carico misurata e le eventuali anomalie. Entrambe le trasmissioni/ricezioni avvengono ogni 25 μ s.

La regolazione della corrente di uscita avviene attraverso tre ponti ad H ad IGBT.

Il ponte denominato Booster, si occupa di fornire gli impulsi di tensione per realizzare i gradini di corrente come descritto nel punto "b". La frequenza di applicazione di un impulso di tensione del Booster è limitata a 3 kHz. I ponti denominati Active Filter 1 e 2 contribuiscono alla tensione totale durante i transitori, realizzano effettiva-

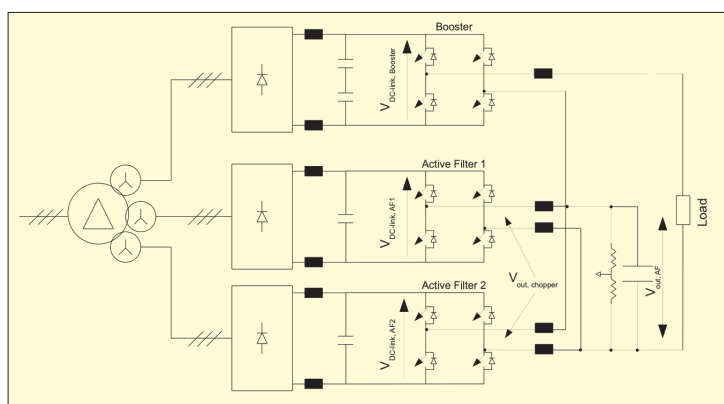


Figura 1a: Principle Scheme

Breve riassunto

Il sistema basato su PXI controlla un alimentatore ± 550 A/ ± 660 V sviluppato in collaborazione tra OCEM SpA ed INFN-CNAO. Il CNAO è dotato di un sincrotrone per accelerare protoni e ioni carbonio dedicati alla cura dei tumori. La dose viene distribuita puntualmente nel piano X-Y tramite l'impostazione di opportune correnti degli alimentatori di due dipoli posti sulla linea del fascio. La qualità del trattamento dipende fortemente dalla precisione e dalla stabilità nel posizionamento del fascio e dalla rapidità di spostamento da un punto all'altro. Ciò si traduce in specifiche molto stringenti per l'alimentatore rispetto alla velocità di salita della corrente (maggiore di 100 kA/s) e alla precisione pari a 100 ppm del fondo scala.

Articolo

Caratteristiche dell'alimentatore

Lo schema di principio dell'alimentatore è riportato in Figura 1 assieme al diagramma del con-

trollare implementato su piattaforma PXI. L'alimentatore è progettato per portarsi ad un qualunque livello di corrente nell'intervallo ± 550 A e mantenerlo in funzionamento continuo. Le specifiche richiedono che questo avvenga con velocità di variazione della corrente >100 kA/s ed in particolare che l'alimentatore rientri nella fascia di precisione di ± 100 ppm (± 55 mA) entro 200 μ s per gradini di corrente ≤ 15 A.

Analisi della struttura e realizzazione del controllo

Un diagramma di principio del controllo è mostrato in Figura 1. Come si può vedere sono previsti diversi anelli di regolazione in cascata. I principi generali adottati sono i seguenti:

- per salti di corrente di ampiezza fino a 2.5 A, solo gli Active Filters vengono azionati ed il Booster è cortocircuitato;
- per salti di corrente superiori a 2.5 A viene azionato il Booster per incrementare la velocità

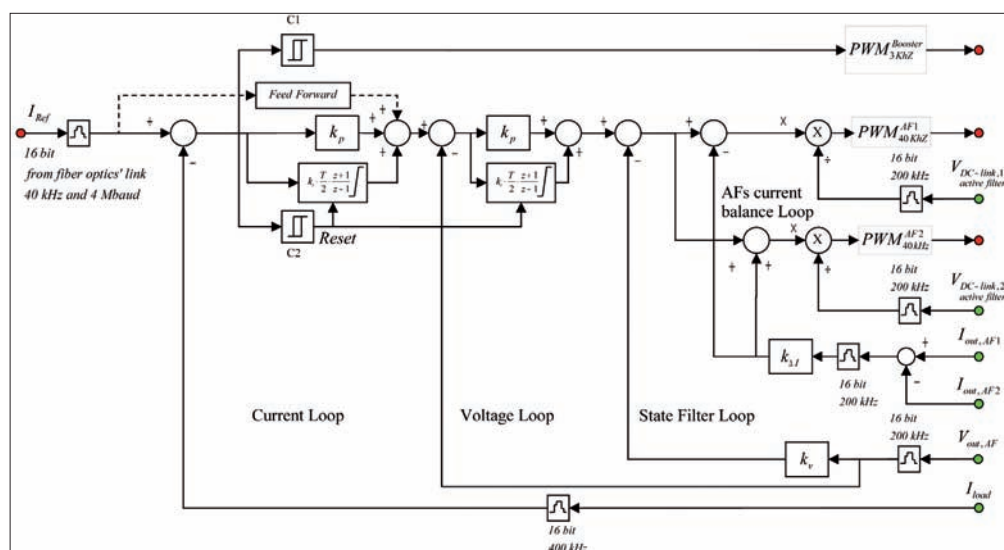


Figura 1b: Control Chart

di variazione della corrente. Il Booster è disattivato tramite un comparatore la cui soglia è impostata a $I_{set} \pm 0.6$ A. Gli anelli di controllo dei filtri attivi portano poi la corrente al valore desiderato.

I problemi principali che sono stati risolti durante la fase di progetto e messa a punto si possono riassumere in:

- selezione di adatti convertitori ADC: è infatti necessario un numero di bit almeno pari a 16 per soddisfare le richieste di precisione con un certo margine nonché una velocità di acquisizione adeguata per limitare l'incertezza del comparatore che comanda il Booster. Per soddisfare i requisiti di specifica si è verificato essere sufficiente una frequenza di campionamento di 400 kS/s;
- messa a punto dei parametri dell'integratore di corrente ottimizzando le soglie degli anti wind-up e del reset per limitare le sovraelongazioni al termine dei transitori;
- messa a punto dei parametri dell'anello di tensione per linearizzare i regolatori Active Filters sull'intero intervallo di funzionamento ed in particolare nell'intorno di corrente di uscita nulla;
- messa a punto delle soglie del comparatore del Booster per compensare i ritardi dei driver nonché la loro variazione con il punto di lavoro;
- valutazione delle non idealità del comportamento del carico sottoposto a transitori di corrente veloci.

Gli anelli di regolazione addizionali come

l'anello di bilanciamento degli Active Filters e di compensazione delle variazioni della tensione di DC-link, contribuiscono al raggiungimento delle prestazioni finali.

Viste dunque le caratteristiche sin qui elencate, il sistema PXI di National Instruments è stato selezionato come il più adatto ad assolvere allo scopo. In particolare il controllore real-time NI-PXI 8195 e la scheda di acquisizione dati NI-PXI 6511 sono stati utilizzati per monitorare lo stato dei vari elementi componenti la macchina; inoltre attraverso le due porte di comunicazione Ethernet (una fornita dal controller e l'altra realizzata con la scheda NI-PXI 8231) si sono realizzati il canale di trasmissione di tutte le grandezze dell'alimentatore al Centro di Controllo del CNAO e la trasmissione/ricezione degli eventi cosiddetti di Timing a cui risponde la macchina a stati del convertitore.

La scheda NI PCI-7833R dotata di processore FPGA, è stata invece utilizzata per implementare tutto l'algoritmo di controllo dell'ali-

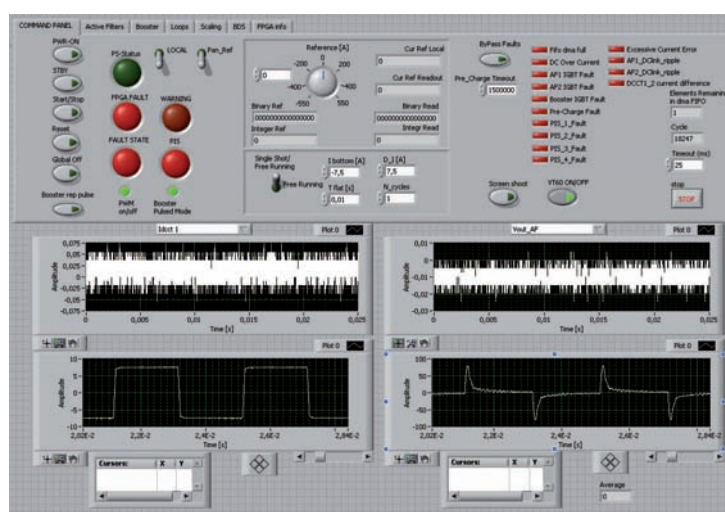


Figura 2: Service Panel

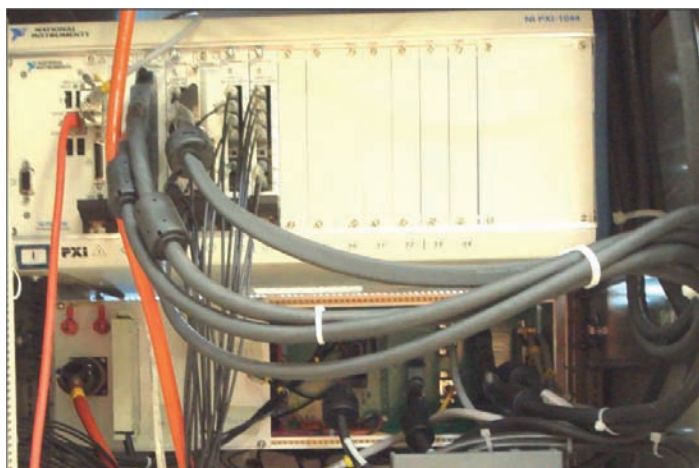


Figura 3a: Elettronica

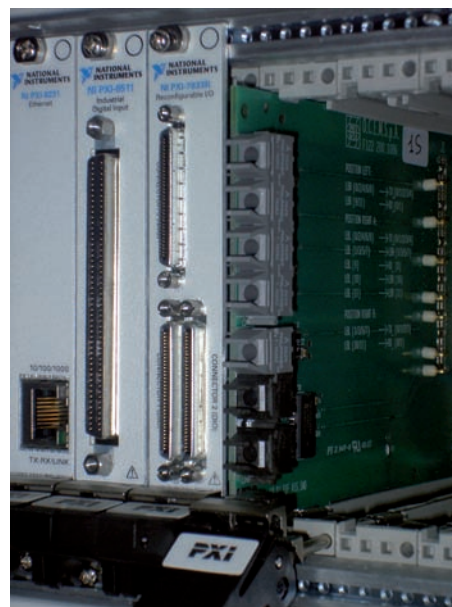


Figura 3b: Scheda Fibre Ottiche

mentatore. Gli 8 convertitori ADC a 16 bit hanno una frequenza di acquisizione di 200 kS/s. Per campionare il segnale di corrente alla richiesta frequenza di 400 kS/s sono stati utilizzati due ingressi ADC opportunamente calibrati con sfasamento temporale di 2.5 us. Tutti i rimanenti ingressi analogici sono acquisiti con tempo di campionamento di 5 us. L'intero algoritmo di controllo è stato impostato su un tempo di ciclo di 2.5 us. Oltre alle funzioni più strettamente legate al controllo degli Active Filters e del Booster, nello stesso ciclo sono inserite molte funzioni di monitoraggio progettate per salvaguardare sia l'alimentatore che la sicurezza delle operazioni. Un certo numero di grandezze è inviato al controllore real-time tramite FIFO DMA; un opportuno software di servizio permette di monitorare queste grandezze ed impostare i parametri sensibili del controllo (Figura 2). Il chip FPGA implementa anche il codice per la comunicazione seriale a 4 Mbaud, per la generazione dei riferimenti di corrente in modalità di funzionamento locale, una macchina a stati per gli eventi critici, la generazione delle PWM. Gli impulsi PWM per gli otto switch degli Active Filters sono generati da cicli indipendenti con tempo di ciclo di 25 ns. Gli impulsi per i quattro switch del Booster sono generati da una macchina a stati implementata nell'algoritmo di controllo principale. I segnali delle PWM e la comunicazione seriale sono prelevati direttamente dalle uscite della FPGA disponibili sul Local Bus del PXI. A questo scopo è stata sviluppata da OCEM una scheda per PXI riconfigurabile che rende disponibili fino a cinque uscite e due ingressi per fibra ottica. Un crate appositamente sviluppato rende possibile il convogliamento di

tutti i segnali analogici e digitali da e verso il PXI (Figura 3.)

In Figura 4 è mostrato a titolo di esempio il risultato di alcune misure finali. Come indicato nella didascalia il grafico "rising edge" mostra l'errore di corrente nel raggiungere la corrente

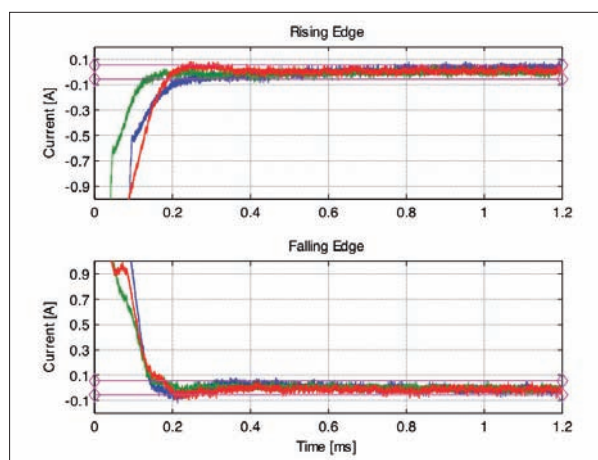


Figura 4: Misure

di 540 A partendo da 525 / 533 / 538 A cioè per gradini di ampiezza 15 / 7 / 2 A; Il grafico "falling edge" mostra l'arrivo a 525 / 533 / 538 A partendo da 540 A. Le linee viola demarcano la fascia di precisione di ± 100 ppm. Si nota che il comportamento è uniforme anche al variare dell'ampiezza del gradino di corrente, le sovraelongazioni sono praticamente nulle, e la corrente di lavoro è raggiunta sempre entro un tempo < 200 us.

Prodotti utilizzati
LabVIEW, LabVIEW FPGA, Data Acquisition, PXI/CompactPCI, Reconfigurable I/O